

# GÉNESIS E IMPORTANCIA DE LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS EN NUBES

F. J. Gordillo Vázquez<sup>(1)</sup>, F. J. Pérez Invernón<sup>(2)</sup> y S. Soler<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA - CSIC), Glorieta de la Astronomía s/n, Granada, España,

<sup>(2)</sup>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen, Alemania

Los rayos son uno de los fenómenos meteorológicos que más llaman la atención del público. Los llamados cazatormentas recorren cientos de kilómetros para capturar estas descargas eléctricas con sus cámaras fotográficas, consiguiendo imágenes impresionantes. En la actualidad existen cada vez más instrumentos diseñados para el estudio de los rayos desde el espacio, ya que esa privilegiada localización ofrece múltiples ventajas a la hora de “cazar” estos rápidos fenómenos naturales. Estos instrumentos están contribuyendo notablemente a proporcionarnos respuestas a los todavía numerosos interrogantes sobre la física y la química de las descargas eléctricas que ocurren en las nubes de nuestro planeta. En este artículo vamos a presentar uno de los últimos descubrimientos sobre el origen de las descargas eléctricas en las nubes gracias a un instrumento que comenzó a funcionar en el espacio en 2018.

La presencia de agua en nuestro planeta impregna su atmósfera posibilitando la formación de nubes (formadas por gotas de agua en suspensión y cristales de hielo de agua) en cuyo interior se inician los rayos que nos son tan familiares. Sin embargo, la mayor parte (tres de cada cuatro) de los rayos de nuestro mundo se producen entre nubes o en el interior de una nube por lo que nunca llegan a la superficie. Aunque sólo uno de cada cuatro rayos llega al suelo, los rayos son una nada despreciable causa de daños a las personas, a las propiedades o instalaciones sensibles y al medioambiente (son frecuente causa de grandes incendios forestales). Los rayos contribuyen también (mediante reacciones químicas que implican muy altas temperaturas) a fijar el inerte nitrógeno molecular de la atmósfera en compuestos como los óxidos de nitrógeno que al reaccionar con el agua de la atmósfera generan compuestos como el ácido nítrico que cae al suelo viajando en las gotas de lluvia, dando lugar a nitratos y otros compuestos nitrogenados que intervienen en la nutrición de las plantas.

Así pues, aunque los rayos son la manifestación más visible y familiar de la actividad eléctrica en la atmósfera terrestre, existen otros muchos tipos de descargas eléctricas en las nubes de tormenta y por encima de ellas (en las capas altas de la atmósfera) de las que poco se sabe y que, sin embargo, podrían tener cierta influencia (aún desconocida) en el equilibrio químico y eléctrico de nuestra atmósfera y que podrían verse afectadas de modos aún bastante inciertos (aumento o disminución de su frecuencia e intensidad) por el calentamiento global. El estudio de todos estos otros tipos de descargas eléctricas atmosféricas apenas tiene 40 años.

Aunque las investigaciones sobre la naturaleza eléctrica de la atmósfera terrestre arrancan a mediados del siglo XVIII, con las primeras aportaciones sobre la electricidad de las tormentas realizadas por Benjamin Franklin entre 1749 y 1752, a día de hoy aún no se tiene una respuesta clara a la pregunta de cuáles son los mecanismos precisos que posibilitan la formación de los rayos en el interior de las nubes de tormenta. Se conocen los elementos que han de participar, esto es, deben existir ciertas condiciones de inestabilidad atmosférica como una fuerte convección (corrientes ascendente de aire) causada por la variación de temperatura que sufren las masas de aire en movimiento vertical, lo cual contribuye al desarrollo de tormentas

eléctricas mediante la acumulación de carga eléctrica de distinta polaridad (positiva y negativa) en los diferentes tipos de partículas existentes en las nubes.

Todavía en 1925 no se conocía con exactitud el número de rayos por segundo a escala planetaria. En aquella época (y hasta el final del siglo XX) se hablaba de alrededor de 100 rayos por segundo. No fue hasta 2003 cuando el análisis de los datos del primer sensor de rayos puesto en órbita terrestre en 1995 reveló a la comunidad científica internacional que la frecuencia de rayos global era de unos 44 por segundo.

Hoy sabemos que los rayos están formados por canales de aire ionizado (debido a la alta corriente eléctrica - entre 3 kA y 30 kA de media - que baja de las nubes al suelo) que alcanzan temperaturas altísimas (existen medidas de hasta 40 000 °C). Los rayos también emiten señales de radio (lo cual permite detectarlos a distancia) tanto en el rango de las muy bajas frecuencia (10 - 400 kHz ó VLF / LF), típico de los rayos nube-suelo, como en los rangos de alta y muy alta frecuencia (3 - 300 MHz ó HF / VHF) propio de los rayos que se producen dentro de nubes o entre nubes de tormenta.

Pero, *¿cómo se generan los rayos?* La respuesta en detalle a esta pregunta sigue, como decíamos antes, sin ser conocida. Sin embargo, en 1980 se descubrieron intensas fuentes pulsadas de radiofrecuencia (RF) procedentes de ciertas descargas eléctricas en el interior de las nubes de tormenta. Estos fuertes pulsos de RF se caracterizaban por tres rasgos importantes: (1) su muy corta duración (apenas 20 microsegundos), (2) un aspecto bipolar (muy rápida subida y bajada de dos pulsos de radio de polaridad positiva y negativa o viceversa) de la forma de onda en el rango de frecuencias VLF / LF y (3) por venir habitualmente seguidos de potentísimos estallidos de radiación VHF / HF.

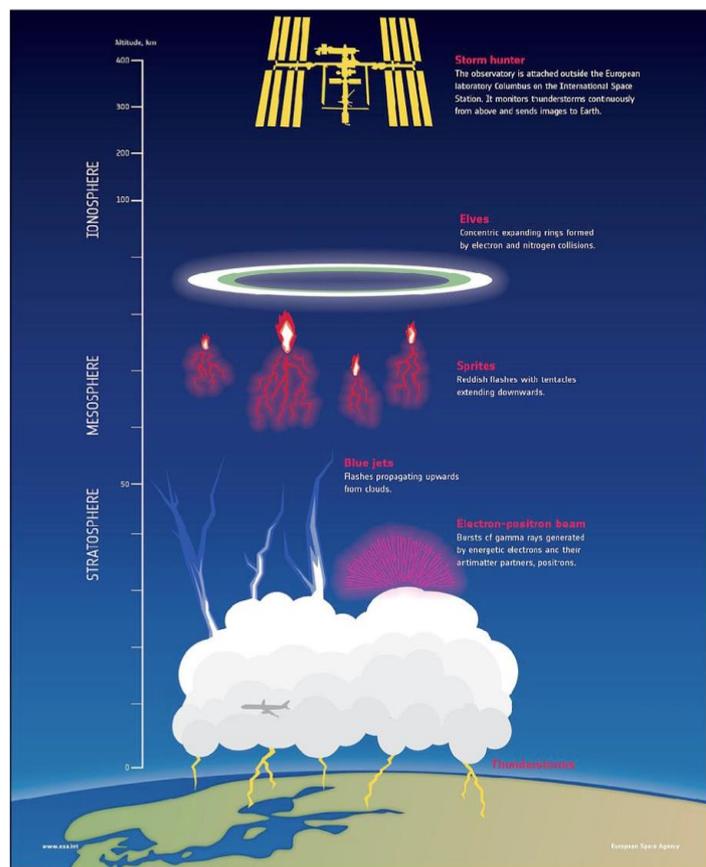
Los procesos impulsivos bipolares descritos arriba reciben el nombre de eventos bipolares estrechos o *narrow bipolar events* (NBE) en inglés. Los NBE detectados en el rango VLF / LF son por lo general diez veces más intensos que las emisiones de radio en el rango HF procedentes de rayos normales intranube o entre nubes. Además, observaciones recientes (2016 y 2017) parecen sugerir que los NBEs son el resultado de procesos muy rápidos de ruptura eléctrica del aire típicos de descargas eléctricas frías, esto es, aquellas que no calientan el aire circundante (al contrario que los rayos normales) y en las que la temperatura de los electrones ambientales alcanzan valores muy elevados de hasta 80 000 °C (unos 7 eV [electrón voltios]). El hecho de que los electrones tengan una masa muy pequeña (2000 veces más ligeros que el átomo más liviano) impide que, aún siendo muy energéticos, puedan calentar el aire circundante.

En 2013 un grupo del Laboratorio Nacional de Los Álamos (en EE.UU.) comenzó a estudiar algunas tenues emisiones ópticas captadas por el satélite FORTE en un amplio rango espectral (entre 400 nm y 1100 nm) que parecían estar asociadas con los característicos pulsos bipolares de radio de los NBE. Este fue el primer indicio óptico de que en las nubes de tormenta podrían estar generándose algún nuevo tipo de descarga eléctrica capaz de dar lugar a intensos pulsos de radiofrecuencia distintos a los emitidos por los rayos. *¿Qué tipo de descargas eléctricas atmosféricas serían capaces de producir los NBEs?* Aunque los rayos emiten luz mayoritariamente en 777 nm (línea del oxígeno atómico en el infrarrojo cercano), el amplio rango espectral óptico (400 nm - 1100 nm) del sensor de FORTE impedía saber con exactitud si se trataba de rayos (improbable por el distinto patrón de radiofrecuencia detectado) o de algún otro tipo de descarga eléctrica. La determinación del tipo de fuente capaz de producir tales

emisiones ópticas de forma sincronizada a intensos pulsos bipolares de radio quedaba pues planteada pero no resuelta.

Con objeto de seguir ahondando en el conocimiento de estos posible nuevos procesos eléctricos en las nubes de tormenta, así como para aumentar nuestro conocimiento general de los fenómenos eléctricos en la atmósfera terrestre y su conexión con otros fenómenos atmosféricos, en abril de 2018 se lanzó con éxito la misión espacial *Atmosphere Space Interaction Monitor* (ASIM) que, días después, se ensambló al módulo europeo Columbus de la estación espacial internacional (EEI ó ISS por sus siglas en inglés). ASIM es una misión de la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés) en las que participan Dinamarca, Noruega y España como socios principales. El objetivo científico de ASIM es estudiar desde la ISS diferentes aspectos de los fenómenos eléctricos naturales en las capas bajas (troposfera) y altas (estratosfera y mesosfera) de la atmósfera terrestre. Originalmente, ASIM se diseñó para estudiar las tormentas eléctricas de la troposfera, los *Fenómenos Luminosos Transitorios* (*Transient Luminous Events* por su nombre en inglés ó TLEs) descubiertos a partir de 1989 y los *Estallidos de Rayos Gamma* en la atmósfera terrestre (*Terrestrial Gamma-ray Flashes* por su nombre en inglés ó TGFs) descubiertos en 1994. Los mecanismos de formación de los TGF en las nubes de tormenta así como su conexión con los rayos u otras descargas eléctricas en las nubes sigue siendo un misterio sin resolver a día de hoy. Los diferentes tipos de TLEs que existen se producen entre la estratosfera (blue jets, blue starters) y la mesosfera (halos, sprites, elves) y su existencia está vinculada a la de los rayos en la troposfera. Los TLEs se caracterizan por unas emisiones ópticas en distintas longitudes de onda a la de las emisiones ópticas más intensas (en 777 nm) de los rayos.

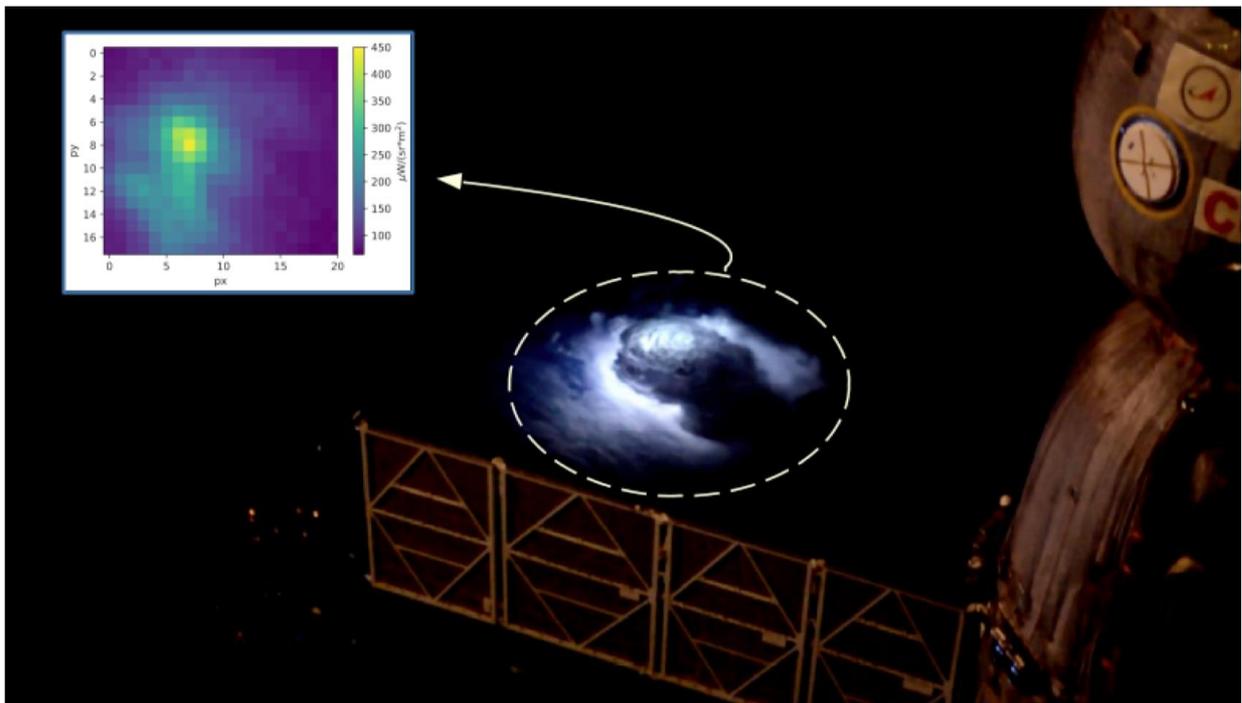
ASIM cuenta con dos instrumentos para la detección y caracterización de rayos, TLEs y TGFs. El primer instrumento consiste en un paquete óptico formado por tres fotómetros ultrarrápidos (100 kHz de frecuencia de muestreo) y dos cámaras. El instrumento óptico de ASIM sólo está operativo durante la noche. Los tres fotómetros están dedicados a monitorizar emisiones ópticas muy rápidas (escala de microsegundos) en los rangos espectrales 180 - 230 nm, 337 nm  $\pm$  2 nm y 777 nm  $\pm$  1.5 nm originalmente pensados para captar emisiones lumínicas transitorias procedentes de TLEs y de rayos (en 777  $\pm$  1.5 nm), respectivamente. Las cámaras de alta resolución espacial (400 m  $\times$  400 m) de ASIM también



**Figura 1:** El instrumento óptico ASIM está acoplado al módulo Columbus de la Estación Espacial Internacional. Su misión es observar los fenómenos eléctricos de nuestra atmósfera, entre los que destacan los rayos, los fenómenos luminosos transitorios (TLEs) y los estallidos de rayos gamma (TGFs). *Créditos: ESA.*

fueron diseñadas para detectar (coordinadamente con los fotómetros) imágenes en los canales 777 nm y 337 nm de la actividad eléctrica en las nubes de tormenta (rayos) y en la alta atmósfera (TLEs). El segundo instrumento a bordo de ASIM es un detector de altas energías (hasta 20 MeV) para captar los TGFs así como su procedencia (dirección) en las nubes de tormenta. Este instrumento puede funcionar tanto durante el día como la noche. Una de las grandes novedades de ASIM ha sido la capacidad de combinar dos instrumentos capaces de captar de forma coordinada (durante la noche) las emisiones ópticas y de altas energías procedentes de fenómenos eléctricos naturales.

En este contexto científico, nuestro grupo ([www.trappa.iaa.es](http://www.trappa.iaa.es)) de electricidad atmosférica del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA - CSIC) ha publicado recientemente (julio de 2020) un trabajo científico\* donde por primera vez se presentan detecciones simultáneas de radiofrecuencia (obtenidas con sensores de VLF / LF en el suelo) y de emisiones ópticas captadas por ASIM en el rango ultravioleta (337 nm) en completa ausencia de emisiones ópticas infrarrojas (777 nm, típicas de rayos). Estas emisiones radio-ópticas tuvieron lugar durante el vuelo de ASIM sobre una intensa tormenta eléctrica que tuvo lugar el 14 de mayo de 2019 en Indonesia que es una de las regiones del mundo con más actividad eléctrica atmosférica.



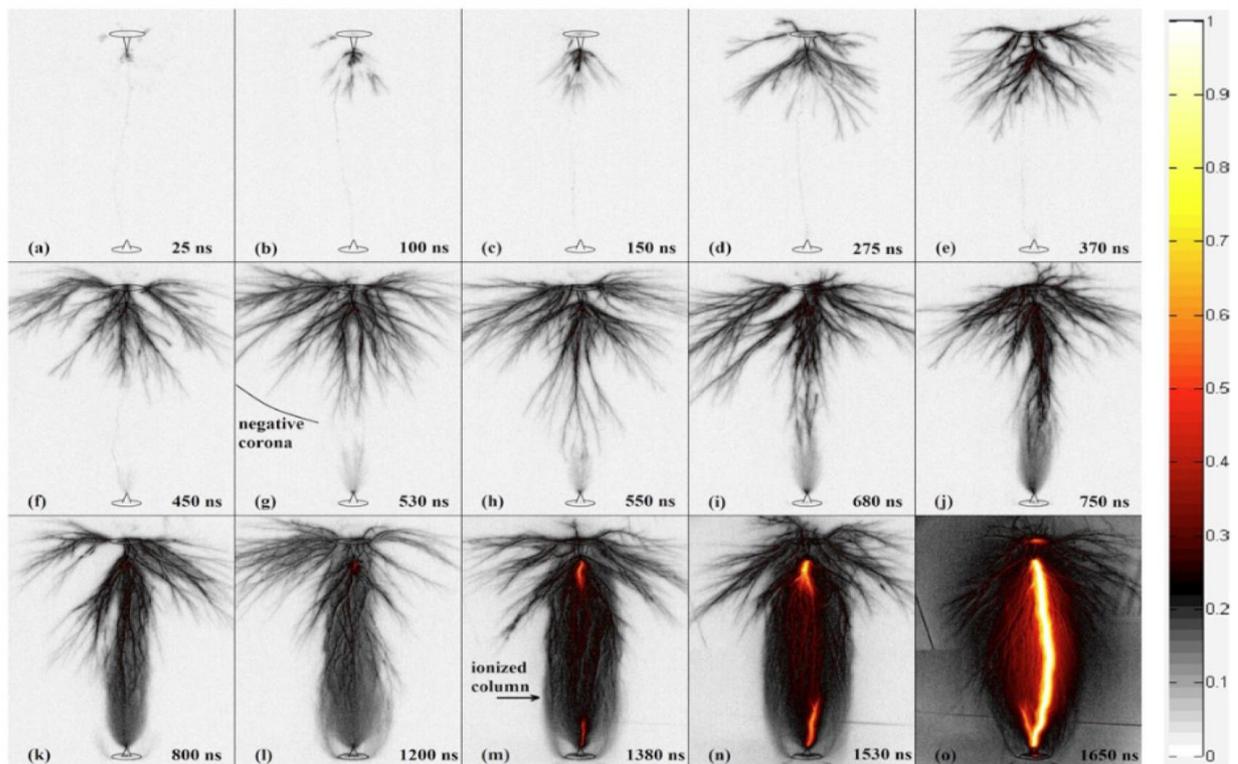
**Figura 2:** Tormenta fotografiada desde la Estación Espacial Internacional por el astronauta Andreas Mogensen de ESA en 2015. El panel sobreimpresionado corresponde a una de las imágenes captadas por la cámara 337 nm de ASIM de una de las descargas tipo corona que forman parte de nuestro estudio. *Créditos: ESA y Soler et al. (2020): <https://doi.org/10.1029/2020JD032708>*.

Nuestra doble y simultánea detección radio-óptica sin emisiones ópticas de rayos (en 777 nm) pero sí de luz en el ultravioleta cercano (337 nm) viene a confirmar que las descargas eléctricas

\* Soler, S., Pérez-Invernón, F. J., Gordillo-Vázquez, F. J., Luque, A., D., Li, Malagón-Romero, A., et al. [2020]. Blue optical observations of narrow bipolar events by ASIM suggest corona streamer activity in thunderstorms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2020JD032708. <https://doi.org/10.1029/2020JD032708>

detectadas por FORTE no eran rayos sino descargas eléctricas frías formadas por filamentos de aire ionizado en los que la temperatura del aire es la del ambiente.

Otro aspecto muy novedoso de nuestro trabajo recién publicado es la puesta a punto de un nuevo método que mediante el análisis del pulso óptico detectado por ASIM permite determinar la altura aproximada de las descargas frías en las nubes de tormenta conocida la altura del techo de esas nubes. El método en cuestión se basa en considerar los procesos de dispersión y absorción de la luz emitida por las descargas eléctricas que ocurren en el interior de las nubes de tormenta. El hecho de que la fuente de luz (la descarga) sea aproximadamente puntual hace que el método sea más exacto aunque puede aplicarse a cualquier pulso óptico (de cualquier color) procedente del interior de las nubes de tormenta. Para comprobar la fiabilidad de este nuevo método óptico, procedimos a comparar su predicción con el resultado de determinar la altura de las descargas frías, usando las señales de radio que emiten y que fueron captadas desde el suelo por receptores de radio VLF / LF ubicados a unos 300 kilómetros de la tormenta estudiada. El resultado fue que ambos métodos daban valores similares. El disponer de un método que sólo necesita un pulso óptico abre la puerta a la estimación sistemática de la posición en el interior de las nubes de tormenta de las descargas eléctricas frías.

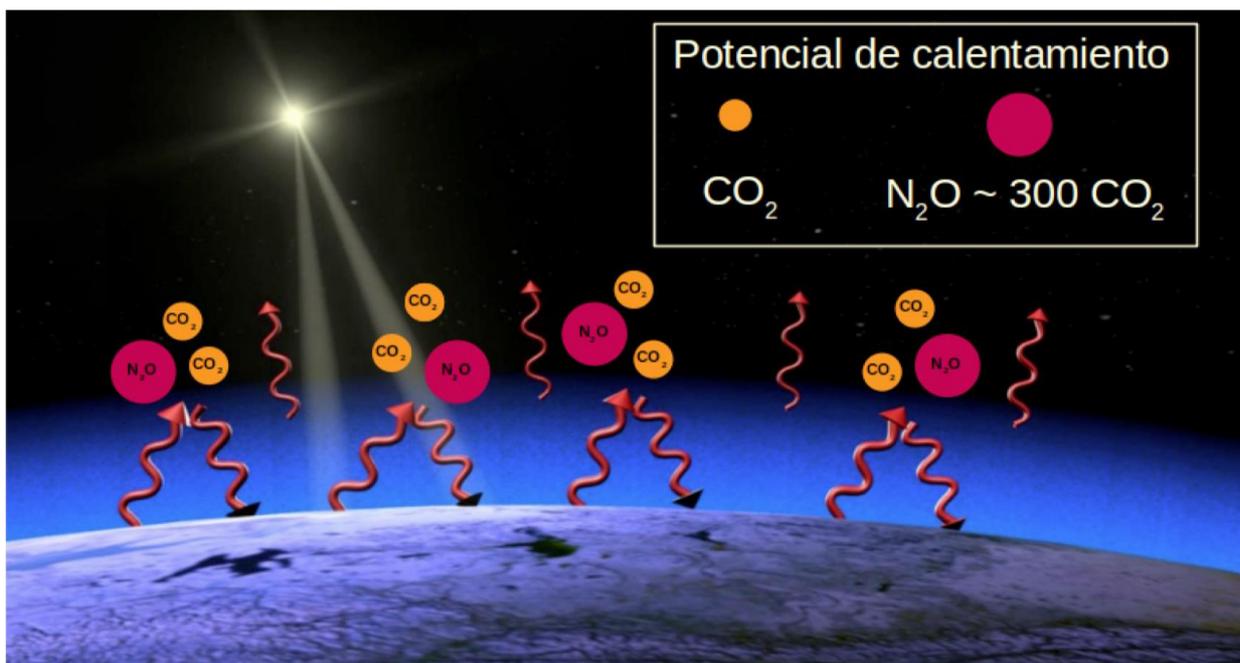


**Figura 3:** Evolución de una descarga tipo corona (filamentos en falso color oscuro) producida en el laboratorio y analizada en una escala de tiempos de decenas de nanosegundos entre dos electrodos separados por una distancia de 127 cm. En la imagen inferior derecha se observa un arco eléctrico formado (canal naranja) similar al canal de un rayo que surge a partir de los cientos de filamentos de la descarga corona. *Créditos:* Kochkin *et al.* (2014): <https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/14/145203>.

Las descargas frías a las que nos estamos refiriendo son descargas eléctricas de tipo corona que cuando se estudian en el laboratorio se caracterizan por su color azulado (emiten en el azul y en el ultravioleta cercano), su aspecto filamentososo (que en realidad son dardos de plasma de aire altamente ionizado) y su enorme desequilibrio térmico; esto es, existe una diferencia muy

grande (varias decenas de miles de grados) entre la temperatura del aire ambiental y la de los electrones dentro del dardo de plasma de la descarga corona.

Además de por sus emisiones ópticas, la alta energía de los electrones producidos en los dardos de plasma de las descargas corona les confiere unas interesantes y únicas propiedades químicas, esto es, pueden activar muy eficientemente reacciones químicas (características del no equilibrio térmico) intermediadas por electrones energéticos que no se pueden llevar a cabo en entornos térmicos (donde sólo se aplica calor) en los que la reactividad química viene mayoritariamente solamente controlada por el choque entre partículas pesadas (átomos, iones y moléculas). Así, medidas de laboratorio indican que mientras que las descargas térmicas (como los rayos) producen óxidos de nitrógeno ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ) y algo de ozono ( $\text{O}_3$ ), las descargas tipo corona producen cantidades significativas de óxido nítrico ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y ozono. El ozono es un gas irritante altamente reactivo (con usos desinfectantes) además de un gas de efecto invernadero. Por su parte, el óxido nítrico es el tercer gas de efecto invernadero más importante después del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y el metano ( $\text{CH}_4$ ). Sin embargo, el óxido nítrico tiene un potencial de calentamiento global (*global warming potential* en inglés) 300 veces superior al del  $\text{CO}_2$  y además se caracteriza por eliminar el ozono ambiental. Estas dos características clave hacen que la cuantificación precisa del óxido nítrico en la atmósfera (de todas sus posibles fuentes y sumideros) sea un asunto crítico de importante relevancia medioambiental ya que su excesiva presencia en la atmósfera terrestre podría dar lugar a un no despreciable aumento del calentamiento global.



**Figura 4:** Ilustración gráfica del potencial de calentamiento de las moléculas de óxido nítrico ( $\text{N}_2\text{O}$ ) respecto a las de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). *Imagen adaptada de NASA*

Las descargas eléctricas de tipo corona son relativamente familiares ya que se pueden producir bajo ciertas condiciones cotidianas. Así, por ejemplo, se pueden observar en tendidos eléctricos de alta tensión (lo cual afecta negativamente al transporte de electricidad ya que indica fugas y/o mal aislamiento) y en puntas afiladas (donde el campo eléctrico se hace mayor) de cualquier estructura metálica (pararrayos, fuselaje de aviones, molinos eólicos, etc.).

Después de todo lo anterior nos podríamos preguntar si de verdad existen tales descargas corona en las nubes de tormenta tal como las conocemos en el laboratorio y en la atmósfera cercana al suelo y, en caso de existir, qué aspecto y tamaño tendrían y cómo influyen en la génesis de los rayos que nos son tan familiares. Los resultados de las investigaciones de nuestro grupo y de otros anteriormente vienen a responder positivamente, esto es, sugieren que si que existen descargas eléctrica tipo corona en el interior de las nubes de tormenta. Sin embargo quedan muchos interrogantes relativos a sus propiedades, procesos de formación y dinámica temporal.

Las detecciones y medidas realizadas por ASIM sugieren que las descargas tipo corona en las nubes de tormenta tienen una naturaleza pulsada. A veces, los pulsos ópticos que se detectan son únicos, pero otras veces tienen dos o más picos.

*¿Cuáles son las dimensiones típicas de las descargas corona en las nubes? ¿Cuál es su frecuencia de ocurrencia a escala global y su distribución geográfica? ¿Podría su ritmo de producción afectar a la frecuencia e intensidad de los rayos? ¿Podrían tener realmente algún efecto sobre la química atmosférica? ¿De qué tipo? ¿Podrían afectar y verse afectadas por el cambio climático?* Son preguntas todas estas que aún no tienen una respuesta cerrada en el contexto de las muchas investigaciones que se llevan cabo por la comunidad científica internacional en el campo de la electricidad atmosférica.

Nuestro grupo de electricidad atmosférica del IAA-CSIC en Granada está activamente trabajando para aclarar algunos de estos apasionantes misterios mediante el exhaustivo análisis de los datos de la misión ASIM junto a la elaboración de modelos y experimentos de laboratorio que pudieran contribuir a esclarecer el papel que juegan las descargas eléctrica de tipo corona en la atmósfera terrestre.